

一种利用干涉敏感度方程的 Pol-InSAR 定标改进算法

周安石 洪峻 齐海宁

(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

摘要: 目前国际上对极化 SAR 干涉定标技术的研究还处在理论和试验的阶段。所提出的算法存在诸多的局限性。本论文在分析极化 SAR 干涉系统误差源的基础上, 提出了利用干涉敏感度方程的 Pol-InSAR 定标改进算法。该算法利用敏感度方程进行迭代参数估计, 不仅提高了基线估计值的精度, 而且克服了 Kim 等人(2000)提出的理论算法中的平地模型假设, 扩大了 Pol-InSAR 定标算法的应用范围。最后通过模拟森林地区 Pol-InSAR 数据, 仿真试验分析比较了改进算法与传统算法定标试验的结果, 改进算法有很大的优势。

关键词: 极化干涉 SAR, 定标算法, 敏感度方程

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2005)10-1576-04

An Improved Pol-InSAR Calibration Algorithm Using Sensitivity Equation

Zhou An-shi Hong Jun Qi Hai-ning

(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract Presently the development of researches on the calibration of Pol-InSAR at the stage of the theory and test. There are many limits in the current algorithm. A new improved algorithm is set up with using the sensitivity equation based on the analysis of the errors source. The algorithm get the parameter value by the iterative method based on the sensitivity equation. The algorithm not only improves the precision but also overcome the flaw of homogeneous flat model, reducing the limit condition. By the simulation experiments, it has been proved that the performances of the new improved algorithm is better than the conventional algorithm.

Key words Pol-InSAR, Calibration algorithm, Sensitivity equation

1 引言

极化合成孔径雷达干涉(Polarimetric-Interferometric SAR, Pol-InSAR)技术是以干涉 SAR 和极化 SAR 测量技术为基础发展起来的一项新的前沿技术。在地形测绘、微地形变化检测、植被生物量估计等众多领域有着重要应用。是很一项有发展前途的新兴技术。

随着 Pol-InSAR 技术的发展, 以及 Pol-InSAR 数据的广泛和深入的应用, 越来越表明 Pol-InSAR 测量技术优势得以发挥强烈依赖于 Pol-InSAR 的定标技术水平。如果没有对 Pol-InSAR 进行精确定标, 就会失去 Pol-InSAR 测量技术的本质。未经定标算法校正的 Pol-InSAR 数据不仅影响 Pol-InSAR 测量精度, 甚至造成错误的测量结果, 反而不能体现出优势。因此, Pol-InSAR 定标技术是 Pol-InSAR 的关键技术。

目前国际上 Pol-InSAR 定标技术的研究尚处于理论研究和初步实验阶段。2000 年 Kim 和 van Zyl^[1] 在理论上提出一种用于 Pol-InSAR 数据的定标技术。但 Kim 等人提出的算法在理

论推导过程中作了较多的假定, 对定标场地和系统的要求比较高, 并且利用该算法估计得到的基线值存在较大的误差。本文在分析 Pol-InSAR 系统, 以及对影响 Pol-InSAR 测量的误差源的分析的基础上, 提出利用干涉敏感度方程的 Pol-InSAR 定标改进算法

2 Pol-InSAR 系统测量模型及误差源分析

Pol-InSAR 系统模型如图 1 所示^[1]。我们注意到这种模型综合了极化 SAR 系统和双基线干涉 SAR 系统。Pol-InSAR 系统的数据采集模式为首先天线 1 接收 HH 和 VH 极化回波信号(序列(1)), 同时天线 2 也接收 HH 和 VH 回波信号(序列(2))。然后垂直极化重复这一过程(序列(3)和序列(4))。

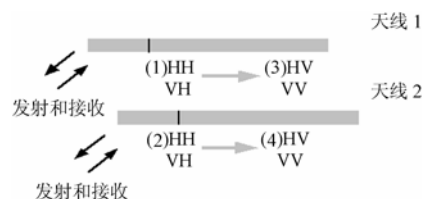


图 1 Pol-InSAR 系统模型

实际过程中,图 1 所示的 Pol-InSAR 通常可通过两种方式实现:单轨道和双轨道。NASA/JPL 就在 1994 年通过双轨道模型采集了大量的 L 波段和 C 波段的航天飞机成像雷达 (Shuttle Imaging Radar C band, SIR-C) Pol-InSAR 数据。随后 NASA/JPL 通过改进他们的机载合成孔径雷达 (Airborne Synthetic Aperture Radar AIRSAR) 系统,于 1998 年和 1999 年采集了单轨道的 Pol-InSAR 数据^[1]。

从上面对所采用的 Pol-InSAR 系统采集数据过程的分析,误差源主要有以下几种:(1) 发射和接收通道存在着许多误差源,使信号产生幅度和相位失真;(2) 极化天线通道间存在信号串扰失真,即系统的 H、V 通道之间没有完全隔离,存在耦合现象;(3) Pol-InSAR 相干斑的存在;(4) 回波信号的去相关性,主要有基线的空间去相关,时间去相关和信号信噪比去相关;(5) 飞行器飞行姿态误差。

对于 Pol-InSAR,必须进行精确的幅度和相位的校准。在 Pol-InSAR 的最优算法中,极化基变化要求进行精确的同极化和交叉极化的复定标。串扰定标、消除极化通道之间的不平衡性以及同极化相位的估计在极化后处理中起关键的作用。尤其对于 Pol-InSAR 应用,干涉相位和相关系数对于不同的极化方式组合的变化会很小,所以相对于单极化定标,Pol-InSAR 数据定标要提高定标的精度,对相位保持极化校准的要求比常规的极化应用就更为严格^[2]。

与干涉 SAR 原理相同,Pol-InSAR 也是通过分析极化相位来获取高程信息的,相位精度是直接影响高程误差的重要因素之一。Pol-InSAR 相位误差影响因素很复杂,包括基线去相关、各种噪声去相关及像元失配等因素。其中基线对相位误差的影响最大。Pol-InSAR 干涉系数定义为

$$\gamma = \gamma_{\text{Int}} \cdot \gamma_{\text{Pol}} = \gamma_{\text{Baseline}} \cdot \gamma_{\text{SNR}} \cdot \gamma_{\text{Temporal}} \cdot \gamma_{\text{Pol}}$$

Pol-InSAR 数字高程的测高精度对 Pol-InSAR 基线和基线角等干涉参数的不确定性提出了十分严格的要求。但就误差性质而言,却是涉及大面积图像中的系统误差,因此在给定的图像场景中使用高程已知的少数点就能校正这个误差。

3 Pol-InSAR 定标理论模型及定标算法改进

3.1 Kim 和 van Zyl 的 Pol-InSAR 定标算法

在文献[1]中, Kim 和 van Zyl 通过分析 Pol-InSAR 系统,理论上提出一种分成两步的 Pol-InSAR 定标算法。在该方法中首先对 Pol-InSAR 数据进行精确极化定标,消除 Pol-InSAR 系统通道串扰以及通道间的不平衡性,得到经过极化定标的 8 幅全极化数据:

$$S_{hh}^u \quad S_{hv}^u \quad S_{vh}^u \quad S_{vv}^u \quad S_{hh}^l \quad S_{hv}^l \quad S_{vh}^l \quad S_{vv}^l$$

其中上标 u 和 l 分别代表两个天线。假设目标满足互易性质,即 $S_{hv} = S_{vh}$ 。然后利用经过极化定标的全极化数据得到 3 幅同

极化干涉图 ($S_{hh}^u S_{hh}^{l*}, S_{vv}^u S_{vv}^{l*}, S_{vh}^u S_{vh}^{l*}$), 通过求 3 幅同极化干涉图间的相位误差的集合平均值,利用所得集合平均的相位误差来估计基线值。数学上表示为

$$\begin{aligned} \Delta_{hhvv} &= \phi_{hh}(r, a) - \phi_{vv}(r, a) \\ &= C_{hhvv} + B_{hhvv}(r, a) + Q_{hhvv}(r, a) + M_{hhvv}(r, a) + n_{hhvv}(r, a) \\ \Delta_{hhhv} &= \phi_{hh}(r, a) - \phi_{hv}(r, a) \\ &= C_{hhhv} + B_{hhhv}(r, a) + Q_{hhhv}(r, a) + M_{hhhv}(r, a) + n_{hhhv}(r, a) \\ \Delta_{hhvv} &= \phi_{hv}(r, a) - \phi_{vv}(r, a) \\ &= C_{hhvv} + B_{hhvv}(r, a) + Q_{hhvv}(r, a) + M_{hhvv}(r, a) + n_{hhvv}(r, a) \end{aligned}$$

其中 C 是常数相位值(雷达通道间的相位差值), B 由于基线产生的相位, Q 是不同散射机制产生的相位, M 是路径相位, n 代表热噪声相位。这里 (r, a) 代表像素在距离和方位中的位置。如果我们在同一雷达扫描区域中对 Δ 进行平均,则与散射机制有关的相位 Q 和噪声 n 引起的相位将会显著降低,亦即 $\langle Q \rangle_\alpha \approx \langle n \rangle_\alpha = 0$, 经过平均,则系统相位误差 ϕ_s 可表示为

$$\phi_s = \langle \Delta(\theta_{ac}) \rangle = C + B(\theta_{ac}) + M(\theta_{ac})$$

θ_{ac} 是波束入射角。

最后根据下面关系式: $B(r, a) = (4\pi/\lambda) \mathbf{n} \delta \mathbf{B}$, 估计出基线的误差,其中 $\delta \mathbf{B} = \delta B_c \mathbf{C} + \delta B_h \mathbf{H}$ 。视角矢量 \mathbf{n} 为 $\mathbf{n} = (-\sin\theta \sin\theta_y - \cos\theta \cos\theta_y \cdot \sin\theta_p) \mathbf{S} + (-\sin\theta \cos\theta_y + \cos\theta \cdot \sin\theta_y \sin\theta_p) \mathbf{C} + \cos\theta \cos\theta_p \mathbf{H}$ 。

在上述基线估计定标算法中, Kim 等人在理论上分析了算法的可行性,但在实际应用中有很大的局限性。首先必须假定所选择的雷达扫描区域为平坦,均匀的区域,扫描区域必须为单一散射机制,并要求没有多径相位存在。其次在重建数字高程模型(Digital Elevation Model DEM)时,基线长度、基线角、轨道高度和干涉相位等参量的测量误差和时延误差,统称为参数偏差。参数偏差将影响 Pol-InSAR 测量地形高度的精度^[3], 高精度的高程测量需要对这些系统误差进行校正,而在 Kim 和 van Zyl 算法中,仅仅能估计出基线的长度值。最后利用 Kim 和 van Zyl 理论定标算法,估计得到的基线值精度不高,存在较大的误差。本文提出在 Pol-InSAR 定标算法利用干涉敏感度方程进行干涉参数估计。

3.2 Pol-InSAR 定标改进算法

在本论文采用 Whitt 点目标定标算法进行极化失真矩阵 \mathbf{R} , \mathbf{T} 的估计。Whitt 算法对点目标的要求非常低^[4], 对系统也不做任何的假定。Whitt 算法用的系统失真模型为

$$\mathbf{M} = \mathbf{A} e^{j\phi} \begin{bmatrix} 1 & \delta_2 \\ \delta_1 & f_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{vv} & S_{vh} \\ S_{hv} & S_{hh} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \delta_3 \\ \delta_4 & f_2 \end{bmatrix} = \mathbf{A} e^{j\phi} \mathbf{R}^T \mathbf{S} \mathbf{T}$$

其中 \mathbf{M} 为系统测量所得的目标散射矩阵, \mathbf{S} 为目标的真实散射矩阵, \mathbf{A} 为系统绝对增益因子, ϕ 为系统绝对相位。

Whitt 算法要求已知 3 个点目标的真实散射矩阵,但至少有一个点目标的散射矩阵是可逆的。从 Whitt 定标算法用于 SIR-C 系统 L 波段全极化数据的定标结果,可以看出 Whitt 算法具有良好的性能^[4]。

针对前面 Kim 等人提出 Pol-InSAR 定标算法中存在的局限性及应用条件的限制, 本文提出利用干涉敏感度方程的 Pol-InSAR 定标改进算法。

由干涉原理可知, 高程为干涉参数及高程反演参数的非线性函数 $h=h(\mathbf{X})$, 其中 \mathbf{X} 为干涉参数及高程反演参数构成的向量 $\mathbf{X}=(r_1 \ B \ \alpha \ H \ \theta)$ 。其中 r_1 为斜距, B 和 α 分别为基线和基线角, H 为轨道高度, θ 为干涉相位。

在 DEM 重建中, 设干涉参数组成的向量为 \mathbf{X}_0 , 由定标数据获得的干涉参数偏差为 $\Delta \mathbf{X}$, 则干涉定标数据获取参数表示为 $\mathbf{X}=\mathbf{X}_0+\Delta \mathbf{X}$, 因而实际测量得到的干涉高程 $h_2=h(\mathbf{X})=h(\mathbf{X}_0+\Delta \mathbf{X})$ 。干涉高程与实际高程之差为

$$\Delta h=h-h_2=h(\mathbf{X}_0+\Delta \mathbf{X})-h(\mathbf{X}_0)=\mathbf{F} \cdot \Delta \mathbf{X}+\mathbf{M}$$

式中 $\mathbf{F}=\left.\frac{\partial h}{\partial \mathbf{X}}\right|_{\mathbf{X}_0}$ 为敏感度矩阵。

上式高程误差模型通过敏感度方程建立了干涉参数偏差与干涉高程差二者之间的关系。通过该模型, 运用适当的参数偏差估计算法, 经过迭代求出满足精度要求的参数偏差, 得到实际参数的近似值。迭代的控制精度为每次迭代前后高程差的均方根, $\text{eps}=\sqrt{\frac{1}{mn} \sum_i^m \sum_j^n (h_{ij}^K-h_{ij}^{K-1})^2}$ 。参数估计算法流程如图 2 所示。

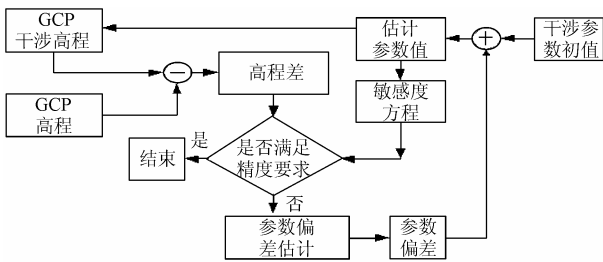


图 2 干涉参数估计流程

应用迭代得到的干涉参数偏差对基线和基线角等干涉参数进行修正, 从而正确重建地形数字高程。采用干涉参数敏感度方程进行干涉参数估计, 不仅消除了 Kim 等人提出的理论算法中的平地模型假设, 而且可以对多个干涉参数进行估计, 扩大了 Pol-InSAR 定标算法的应用范围。有关利用干涉敏感度方程进行干涉参数估计的具体分析, 见参考文献 [5]。

4 仿真试验及结果分析

4.1 地面目标模型及数据模拟

本论文数据模拟采用了简单的三层模型^[3,6] (如图 3 所示)。简单三层模型的体参数设置如下:

(1) 实验目标区域的大小设置为 128×128 , 其中 64×64 区域大小为三层结构模型, 其它为平地散射模型, 并且在其中放置了 3 个点目标定标器;

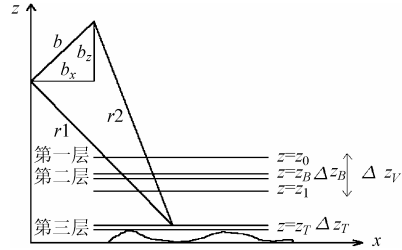


图 3 目标模型及干涉几何示意图

(2) 类型设为植被均匀覆盖的地面, 植被树冠厚 4m, 距地面 4m。地形设为平地, 高度为 1000m;

(3) 在 Pol-InSAR 模拟中, 我们采用了单天线, 双轨道模式系统进行模拟, 系统参数部分采用了 NASA/JPL 的成熟的双天线干涉 SAR 系统 TOPSAR 的参数(见表 1)。在 Pol-InSAR 数据模拟中, 假设加性热噪声 \mathbf{N} 为 $\mathbf{0}$ 矩阵。

表 1 Pol-InSAR 系统参数

中心频率 f_c (GHz)	波长 λ (cm)	天线长度 L (m)	基线长度 B (m)	基线倾角 λ ($^\circ$)
5.2873 (C-band)	5.67	1.6	2.583	62

4.2 仿真试验

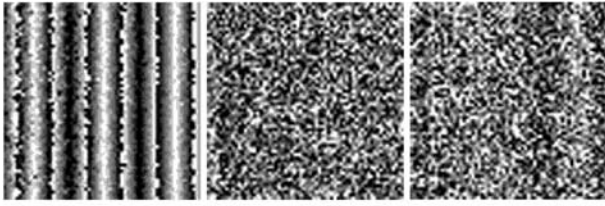
为了说明改进算法的优越性, 我们进行了仿真试验。在不影响本文主要问题研究的前提下, 为简便起见, 数据模拟过程中没有考虑 Pol-InSAR 系统轨道高度和干涉相位测量值等参数的不确定性。其中接收和发射天线失真矩阵 \mathbf{R}, \mathbf{T} 定义如下:

$$\mathbf{R}^T = \begin{bmatrix} 1 \angle 0^\circ & 0.08 \angle 83^\circ \\ 0.06 \angle -61.70^\circ & 0.77 \angle 24.79^\circ \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 \angle 0^\circ & 0.17 \angle -61.07^\circ \\ 0.08 \angle 150.95^\circ & 0.83 \angle 69.20^\circ \end{bmatrix}$$

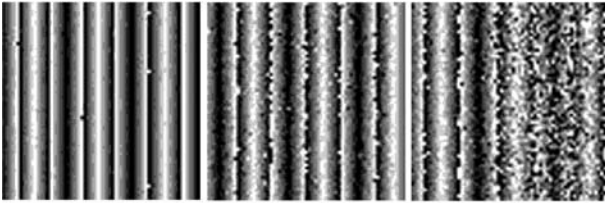
基线长度偏差为 0.023m, 基线角度偏差为 0.15° , 实际基线长度为 2.56m, 基线角为 61.85° 。

设体散射模型中各分量的散射幅度比为 $A_p:A_B:A_T=10:5:1$, 由前面的仿真试验模型产生得到的未经定标的干涉相位如图 4 所示。当目标的散射主要为体散射时, 未经定标 Pol-InSAR 相位图的最优干涉相位图 2 和图 3 根本不能形成条纹。可见在 Pol-InSAR 最优算法中利用极化基转换选择具有最大相干性的散射机制来形成干涉图时, 系统误差对最优算法有很大的影响。由结果可以明显的看到, 最优干涉相位图 2 和图 3 也能很好的形成干涉条纹, 也就是说, 经过定标算法校正, Pol-InSAR 能很好地区分出 3 种不同的散射机制, 很好地确定了不同散射机制的散射中心, 从而能准确的估计出植被高度和地形高程。而经过 Pol-InSAR 定标算法校正后得到相位如图 5 所示。定标前后 DEM 比较结果见表 2。



(a) 最优干涉相位图 1 (b) 最优干涉相位图 2 (c) 最优干涉相位图 3

图 4 未经定标的最优干涉相位图



(a) 最优干涉相位图 1 (b) 最优干涉相位图 2 (c) 最优干涉相位图 3

图 5 定标后的最优干涉相位图

表 2 定标前后高程比较

最优干涉图	定标前			定标后		
	平均高程	高程均方差	相干系数 r	平均高程	高程均方差	相干系数 r
1	1005.9	0.251832	0.99980	1006.63	0.495683	0.99999
2	1003.83	10.4199	0.98767	1004.72	1.18347	0.99963
3	1008.35	47.9076	0.93128	1000.4	1.70746	0.99871

注: 此处区域为 64×64 大小, 为简单 3 层模型高程。

从上面的结果可以看出, 定标前最优干涉图 2 和 3 的平均高程与定标后的高程有比较大的差值, 尤其对于最优干涉图 2 和图 3 高程均方差定标前后有很大的差别。由此可见 Pol-InSAR 系统误差对高程估计的影响, 以及本论文定标模型和算法的正确性。

4.3 两种定标算法估计基线及得到的高程结果比较

由 Kim 算法估计出的基线长度为 $B=2.9537\text{m}$, 估计结果存在比较大的误差。经改进算法中干涉敏感度方程迭代得到的基线长度 $B=2.56037\text{m}$, 基线角 $=61.865^\circ$ 。Pol-InSAR 参数偏差估计迭代情况如表 3 所示:

表 3 干涉参数偏差估计

迭代次数	基线估计值 误差(m)	基线角估计值 误差($^\circ$)	控制精度
1	0.020611	0.104761	0.6820
2	0.0224605	0.114168	0.6217
3	0.0226147	0.114952	0.0552
4	0.0226274	0.115018	0.0046
5	0.0226285	0.1201	0.00038
6	0.0226286	0.1320	3.15e-5
7	0.0226286	0.13516	2.6e-6

采用两种算法估计得到的基线和基线角参数进行 DEM 重建, 得到的高程比较结果如表 4。从表中数据的比较结果, Kim 算法对高程估计存在很大的偏差。而通过敏感度分析得到的基线和基线角干涉参数偏差值对干涉参数进行修正, 利用修正以后的基线和基线角生成的 DEM, 比较符合实际情况。

表 4 两种算法高程估计结果比较

最优干涉图	Kim 算法		改进算法	
	平均高程	高程均方差	平均高程	高程均方差
1	997.273	5.09205	1006.63	0.495683
2	995.617	5.55872	1004.72	1.18347
3	990.238	7.45885	1000.4	1.70746

5 结束语

本文在分析了 Kim 等人提出的 Pol-InSAR 定标算法局限性基础上, 提出利用干涉敏感度方程的 Pol-InSAR 定标改进算法, 改进算法不仅提高了基线估计值的精度, 而且克服了 Kim 等人提出的理论算法中的平地模型假设, 扩大了 Pol-InSAR 定标算法的应用范围。利用改进算法, 可以对多个 Pol-InSAR 系统参数进行估计。最后通过仿真试验, 首先验证了所提出的 Pol-InSAR 定标算法的正确性, 然后比较分析了两种定标算法的试验结果, 显示改进算法的优越性。

参考文献

- [1] Yunjin Kim, van Zyl J. Overview of Polarimetric Interferometry [C]. Aerospace Conference Proceedings, Big Sky, MT, USA, 03/18/2000 – 03/25/2000, vol.3: 231 – 236.
- [2] Papathanassiou K P, Reigber A, Scheiber R. Airborne Polarimetric SAR Interferometry[C]. Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings, Seattle, WA, USA 07/06/1998 – 07/10/1998, vol.4: 1901 – 1903.
- [3] 陈小英. 极化 SAR 干涉测量地形参数方法研究[D]. [硕士论文], 北京: 中国科学院电子学研究所, 2002.
- [4] Whitt M W, Ulaby F T, Polatin P, et al.. A general polarimetric radar calibration technique[J]. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 1991, 39(1): 62 – 67.
- [5] 王彦平. 机载干涉 SAR 定标模型与算法研究[D]. [博士论文], 北京: 中国科学院电子学研究所, 2003.
- [6] Cloude S R, Papathanassiou K P. Polarimetric SAR interferometry[J]. *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 1998, 36(5): 1551 – 1565.

周安石: 男, 1979 年生, 硕士, 从事极化 SAR 干涉定标技术研究。

洪峻: 男, 1960 年生, 研究员, 硕士生导师, 主要从事微波遥感应用领域研究。

齐海宁: 男, 1979 年生, 硕士, 主要从事极化 SAR 干涉成像技术研究。